Cronométria de Interacción Causal

Darío Ricardo De Santiago Sasinka
Afiliación: https://www.frc.utn.edu.ar
ORCID: 0000-0002-7684-9532
DOI: 10.5281/zenodo.18615665

febrero de 2026

Resumen

Este artículo explora la relación entre las limitaciones cuánticas y las interacciones causales dentro del marco relativista. Proponemos una extensión de la Transformación de Lorentz, llamada *Transformación de Lorentz Operacional (TLO)*, que incorpora un límite temporal mínimo inherente, asociado al tiempo de Planck T_P. Argumentamos que este límite no solo afecta la precisión de la sincronización de relojes y la medición de eventos, sino que también sugiere una interpretación operacional de la flecha del tiempo, derivada de la acumulación de incertidumbres en las interacciones físicas. Este enfoque abre nuevas perspectivas sobre la causalidad, el tiempo y la estructura fundamental de la realidad.

1. Introducción

La medición precisa del tiempo y el espacio es uno de los pilares fundamentales de la física moderna. En la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre de Heisenberg [1] impone límites operacionales fundamentales en la precisión de las mediciones, mientras que la relatividad general describe la sincronización de relojes y la determinación de eventos con gran precisión. Sin embargo, en la teoría cuántica, la incertidumbre de Heisenberg introduce una limitación inherente en las mediciones de posiciones y momentos, en contraste con la relatividad general, que idealiza las interacciones como eventos puntuales, sin incorporar una incertidumbre mínima intrínseca en el tiempo o el espacio.

Este trabajo aborda cómo la incorporación de la incertidumbre cuántica puede modificar la interpretación de las interacciones causales en el marco relativista. Se introduce el concepto de un límite temporal irreducible, dado por

$$T_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}, \tag{1}$$

el cual implica que cualquier medición que involucre señales físicas debe enfrentarse a un *peaje temporal* fundamental, afectando tanto la precisión de las mediciones como las transformaciones de Lorentz en sistemas inerciales.

El objetivo de este artículo es analizar cómo esta limitación, que emerge de la mecánica cuántica, impacta en las interacciones causales dentro de la relatividad general. En este contexto, se presenta la **Transformación de Lorentz Operacional (TLO)**, que incorpora un término asociado a este límite temporal irreducible, con el fin de proporcionar una mejor comprensión de las restricciones operacionales que afectan las mediciones físicas.

Aunque la acumulación de incertidumbre temporal da lugar a lo que podría interpretarse como una *flecha del tiempo operacional*, este fenómeno surge de manera inevitable a partir de la interacción causal y la acumulación de incertidumbres a lo largo de cadenas causales. El enfoque principal de este trabajo radica en cómo las limitaciones cuánticas afectan las mediciones causales y las transformaciones relativistas.

2. Límite fundamental en mediciones relativistas

Toda medición de coordenadas espaciotemporales requiere intercambio de información mediante señales físicas. En el marco relativista, esta señal es un fotón que viaja a velocidad c. Para medir la posición x de un evento con precisión Δx, el principio de incertidumbre de Heisenberg [1] impone:

$$\Delta p \sim \frac{\hbar}{\Delta x} \tag{2}$$

La energía correspondiente del fotón es:

$$E_\gamma = pc \sim \frac{\hbar c}{\Delta x} \tag{3}$$

Si $\Delta x \to 0$, entonces $E_\gamma \to \infty$. Sin embargo, un fotón con energía E_γ genera un campo gravitatorio cuyo radio de Schwarzschild es:

$$R_s \sim \frac{G E_\gamma}{c^4} \tag{4}$$

Cuando E_γ alcanza la energía de Planck[2] $E_P = \sqrt{\hbar c^5/G}$, se satisface:

$$R_s \sim \frac{\hbar c}{E_P} \sim L_P \tag{5}$$

donde $L_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$ es la longitud de Planck. Este cruce de escalas indica que no es físicamente posible usar un fotón con $E_\gamma > E_P$ para medir coordenadas, sugiriendo la existencia de un límite operacional fundamental:

$$\boxed{\Delta x > L_P, \quad \Delta t > T_P} \tag{6}$$

No existe procedimiento operacional conocido que permita resolver distancias menores que L_P sin colapso gravitatorio.

3. Postulado operacional de Cronométrica de Interacción Causal (PCIC)

Del análisis anterior se deduce que toda interacción causal (emisión, absorción, detección o medición) tiene una incertidumbre temporal intrínseca cuya cota inferior está dada por:

$$\boxed{\delta\tau_{\text{int}} > T_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} > 0}. \tag{7}$$

Esta cota emerge de la combinación de:

- El principio de incertidumbre de Heisenberg: $\Delta E \cdot \delta t \gtrsim \hbar$
- El límite gravitatorio en energía: $E_\gamma \lesssim E_P$

La incertidumbre exacta depende de la energía característica de la interacción:

$$\delta\tau_{\text{int}} \sim \text{máx}\left\{T_P, \frac{\hbar}{2\Delta E_{\text{int}}}\right\}. \tag{8}$$

Para interacciones que involucran energías $\Delta E \sim E_P$ se alcanza el mínimo $\delta\tau \sim T_P$. Para energías menores, $\delta\tau > T_P$. Este no es un límite epistemológico, sino estructural: mejorar la precisión requiere aumentar ΔE, pero el límite gravitatorio en E_P establece una cota fundamental.

4. Transformación de Lorentz Operacional (TLO)

Las transformaciones de Lorentz estándar relacionan coordenadas ideales entre sistemas inerciales:

$$x' = \gamma(x - vt), \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right). \tag{9}$$

Sin embargo, toda medición física está sujeta a las limitaciones operacionales fundamentales $\Delta x > L_P$ y $\Delta t > T_P$. En consecuencia, las coordenadas *medidas* difieren de las coordenadas ideales obtenidas mediante las transformaciones de Lorentz por términos operacionales irreducibles:

$$x'_{\text{med}} = \gamma(x - vt) + \delta x, \qquad \delta x > L_P, \tag{10}$$

$$t'_{\text{med}} = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) + \delta t, \qquad \delta t > T_P. \tag{11}$$

Estos términos no modifican las transformaciones de Lorentz ideales ni introducen una nueva geometría del espacio-tiempo, sino que explicitan los límites operacionales universales asociados a toda medición o interacción causal física.

5. Sincronización de Einstein y cadena causal

5.1. El límite en la sincronización de relojes

Einstein[3], en la formulación operacional de la relatividad especial, propuso sincronizar dos relojes en reposo mediante el intercambio de señales luminosas. Si un rayo es emitido desde el reloj A en t_A, reflejado en B en t_B, y recibido de vuelta en A en t'_A, se define:

$$t_B = t_A + \frac{1}{2}(t'_A - t_A). \tag{12}$$

Este procedimiento supone tácitamente que la emisión, reflexión y detección son eventos instantáneos. Sin embargo, cada una de estas etapas es una *interacción causal* sujeta al PCIC:

- Emisión en A: $\delta t_{\text{emis}} > \hbar/(2E_\gamma)$
- Reflexión en B: $\delta t_{\text{refl}} > \hbar/(2E_\gamma)$
- Detección en A: $\delta t_{\text{det}} > \hbar/(2E_\gamma)$

La incertidumbre total acumulada es:

$$\Delta t_{\text{sinc}} > \frac{3\hbar}{2E_\gamma}. \tag{13}$$

Para minimizar esta incertidumbre se requiere maximizar E_γ, pero el límite gravitatorio impone $E_\gamma \lesssim E_P$. Por tanto, existe una cota fundamental:

$$\boxed{\Delta t_{\text{sinc}}^{(\text{mín})} \gtrsim \frac{3\hbar}{2E_P} \sim T_P}. \tag{14}$$

Consecuencia: No es posible sincronizar dos relojes con precisión mejor que T_P. La simultaneidad, ya relativa al observador según Einstein, adquiere además una incertidumbre operacional irreducible del orden del tiempo de Planck.

5.2. Cadena causal y acumulación irreversible

Aunque δt se introduce inicialmente como una incertidumbre temporal, su carácter estrictamente positivo y su asociación a una interacción causal física la convierten en un costo operacional irreducible. A diferencia de las incertidumbres estadísticas, que pueden cancelarse o reducirse mediante promediado, cada $\delta t > T_P$ representa una duración mínima efectiva durante la cual una interacción causal debe transcurrir. En este sentido, δt actúa como un *peaje causal mínimo* que debe pagarse para que la causalidad física tenga lugar.

Una secuencia de eventos causalmente conectados $E_1 \to E_2 \to \cdots \to E_N$ constituye una *cadena causal*. Cada flecha representa una interacción con incertidumbre $\delta t_k > T_P$. La incertidumbre temporal total se acumula:

$$\Delta t_{\text{cadena}} = \sum_{k=1}^{N-1} \delta t_k > (N-1)T_P. \tag{15}$$

Dado que las interacciones son causalmente secuenciales e independientes, se adopta una cota superior conservadora mediante suma lineal de incertidumbres. Esta acumulación es estrictamente positiva y no se invierte bajo inversión temporal. Intentar revertir la cadena genera una nueva secuencia de incertidumbres $\delta t'_k > T_P$, de modo que el ciclo completo $E_1 \to \cdots \to E_N \to \cdots \to E_1$ satisface:

$$\Delta t_{\text{ciclo}} > 2(N-1)T_P > 0. \tag{16}$$

Incluso si se regresa a la misma configuración dinámica, operacionalmente ha transcurrido un tiempo mínimo positivo. La irreversibilidad temporal queda así caracterizada operacionalmente de la acumulación de incertidumbres en toda cadena causal.

6. Propiedades de la TLO

6.1. Positividad temporal irreducible

El término $\delta t > T_P > 0$ es estrictamente positivo. Bajo inversión temporal $t \to -t$:

- El término de Lorentz γt cambia de signo (reversible dinámicamente).
- El término operacional δt **no cambia de signo** (siempre positivo).

Esta asimetría es irreducible y emerge del acto de medir, no de la dinámica de las ecuaciones.

6.2. Irreversibilidad operacional

Como se muestra en la sección anterior, toda cadena causal acumula una incertidumbre temporal $\Delta t_{\text{cadena}} > (N-1)T_P > 0$. Consideremos un proceso $A \to B$ que involucra N_1 interacciones. Intentar revertirlo invirtiendo todas las velocidades genera un nuevo proceso $B \to A'$ con N_2 interacciones adicionales. El tiempo total satisface:

$$\Delta t_{\text{total}} > (N_1 + N_2)T_P > 0. \tag{17}$$

No existe retorno temporal exacto en sentido operacional. Se obtiene una flecha del tiempo operacional inevitable por la acumulación positiva de incertidumbres temporales, no de condiciones iniciales especiales ni de consideraciones estadísticas.

6.3. Preservación de la invariancia de Lorentz

La Transformación de Lorentz Operacional no modifica las transformaciones de Lorentz ideales ni introduce nuevas estructuras geométricas en el espacio-tiempo. Las ecuaciones dinámicas fundamentales conservan su forma relativista estándar en todo sistema inercial.

Los límites operacionales $\delta x > L_P$ y $\delta t > T_P$ no representan coordenadas espacio-temporales ni transforman como tales, sino cotas universales asociadas al acto físico de medición o interacción causal. En consecuencia, estos límites son idénticos para todos los observadores inerciales y compatibles con el principio de relatividad.

La invariancia de Lorentz se preserva porque las relaciones entre coordenadas ideales permanecen exactas, mientras que los términos operacionales expresan restricciones físicas universales independientes del sistema de referencia.

7. Verificación y falsabilidad

El marco presentado es falsable en principio. Se refutaría si se observara:

1. Una interacción causal con $\delta t < T_P$.
2. Una medición de posición con $\Delta x < L_P$ en regímenes de alta energía ($E \sim E_P$).
3. Reversión exacta de una cascada causal larga sin costo temporal neto.

En el límite de bajas energías ($E \ll E_P$), se recupera el principio de incertidumbre estándar $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$.

8. Discusión

El PCIC y la TLO proporcionan una fundamentación operacional para la flecha del tiempo independiente de argumentos estadísticos [4] o cosmológicos. A diferencia de enfoques que postulan irreversibilidad mediante condiciones iniciales especiales, aquí la asimetría temporal emerge de límites operacionales en las interacciones.

Esta perspectiva se alinea con visiones contemporáneas que enfatizan el carácter relacional del tiempo [5], pero añade un ingrediente novedoso: un costo causal mínimo T_P que rompe la simetría temporal a nivel fundamental.

9. Conclusiones

Este trabajo ha mostrado que todas las interacciones causales, mediadas por señales físicas, están sujetas a límites operacionales fundamentales de tiempo y espacio ($\delta t > T_P$, $\delta x > L_P$). Estos límites no son meras incertidumbres epistemológicas, sino peajes causales inherentes a la medición y a la interacción física. La Transformación de Lorentz Operacional (TLO) refleja cómo las coordenadas medidas deben incorporar estos límites, lo que establece una flecha del tiempo no dependiente de condiciones iniciales o estadísticas, sino de la acumulación de incertidumbres en

las interacciones. Esto impone restricciones a la sincronización de relojes y a la medición precisa de eventos, lo que sugiere que la causalidad tiene un costo temporal irreducible. Queda abierta la cuestión de si todas las interacciones, incluso a escalas extremas, respetan estos límites fundamentales, lo que podría tener profundas implicaciones para nuestra comprensión del universo y la estructura de la realidad.

Referencias

[1] Werner Heisenberg. Über den anschaulichen inhalt der quantentheoretischen kinematik und mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43:172–198, 1927.

[2] Max Planck. Zur theorie des gesetzes der energieverteilung im normalspektrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2:237, 1900.

[3] Albert Einstein. Zur elektrodynamik bewegter körper. *Annalen der Physik*, 322(10):891–921, 1905.

[4] Johann Loschmidt. Über den zustand des wärmegleichgewichtes eines systems von körpern. *Wiener Berichte*, 73:128–142, 1876.

[5] Carlo Rovelli. *The Order of Time*. Penguin Books, 2018.

iA

El presente artículo contó con la asistencia de herramientas de IA para la corrección de estilo, traducción técnica y codificación en LaTeX, bajo la supervisión y validación final del autor.

Licencia:

Creative Commons Atribución
(CC BY 4.0)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a familiares y amigos el apoyo incansable

Este trabajo está dedicado a mi Esposa Flavia e Hijo Elías con todo mi amor.

DaDoDs
68456@metalurgica.frc.utn.edu.ar

"Scientes ubi inveniatis"